

蓝宝石与 Invar 合金超快激光选区微焊接 接头组织和性能

蒋青¹, 徐佳宜¹, 杨瑾¹, 赵一璇¹, 潘瑞², 李鹏³

(1. 上海工程技术大学, 上海, 201620; 2. 北京工业大学, 北京, 100124; 3. 上海无线电设备研究所, 上海, 201109)

摘要: 采用飞秒激光选区微焊接技术制备了蓝宝石/Invar 合金异质材料接头, 研究了激光功率对接头密封性、宏观形貌和剪切性能的影响. 采用扫描电子显微镜、能谱分析仪和激光共聚焦显微镜等表征了接头界面焊接缺陷与元素分布的规律以及接头断裂行为. 结果表明, 蓝宝石和 Invar 合金分别经过非线性吸收和线性吸收作用, 材料发生了熔化、混合和扩散, 形成了犬牙交错的连接界面, 说明界面存在着冶金结合和机械咬合双重作用. 接头抗剪强度随激光功率单调增加, 当激光功率为 10.19 W 时, 最大抗剪强度为 145.3 MPa. 蓝宝石/Invar 合金接头的断裂形式主要为解理性断裂, 两侧断口均有 Fe, Ni, Al 和 O 元素, 进一步说明了超快激光促进了两种材料在界面的冶金反应.

创新点: (1) 实现了蓝宝石/Invar 合金飞秒激光选区微焊接接头的制备.

(2) 分析了激光功率对飞秒激光选区连接蓝宝石/Invar 合金接头组织和性能的影响.

关键词: 飞秒激光; 蓝宝石; Invar 合金; 微焊接; 选区连接

中图分类号: TG 456; TG 136⁺.3

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20230613012

0 序言

蓝宝石因其卓越的力学性能、光学性能和化学稳定性, 被广泛应用于红外军事装置、卫星空间技术、高强度激光的窗口材料、半导体和大规模集成电路的衬底材料^[1]. 上述应用往往涉及蓝宝石与其它结构件或功能部件的连接, 其中较有代表性为武器装备光学窗口及整流罩构件, 其制造过程往往涉及蓝宝石与金属的连接问题. 众所周知, 蓝宝石具有极高的化学稳定性, 与大多数金属材料之间的反应、扩散和界面结合比较困难^[2]; 此外, 蓝宝石与金属的热膨胀系数差异较大, 蓝宝石与金属的连接件经高温加热后, 在冷却的过程中易产生较大的残余应力, 容易形成裂纹等缺陷^[3], 因此如何实现蓝宝石与金属的高强度、低应力和高精度连接是关键问题. 现有蓝宝石等透明硬脆材料与金属的连接技术主要包括胶接^[4]、扩散焊^[5]、钎焊连接^[6]和激光焊

接^[7]等方法, 其制造的蓝宝石/金属结构件在服役于高温、高压、噪声、震动、冲击、过载等严苛条件下依然存在各种问题. ① 胶接使用的高分子聚合物只能在低温环境下工作, 工作温度一般不超过 300 °C, 并且高分子聚合物易老化, 造成服役件寿命和可靠性下降; ② 扩散连接需要很高的连接温度, 在接头的偏硬脆性材料侧产生较大应力; ③ 钎焊连接在一定程度上提高了蓝宝石与金属构件的连接强度, 但钎焊过程中钎料对蓝宝石的润湿较为困难, 需在真空环境下或惰性气体环境中才能实现, 此外钎焊一般需进行高温加热, 在冷却的过程中易产生较大的残余应力; ④ 由于透明硬脆材料的非线性吸收特性, 传统激光焊接能量很难在透明硬脆材料中进行精准调控, 材料内部易形成较大的热影响区, 而使不同热膨胀系数的材料在焊接过程中发生破裂. 为避免热膨胀系数差异所造成的缺陷, 实际应用中常选择与蓝宝石热膨胀系数相近的 Invar 合金作为连接材料, Invar 合金热膨胀系数远低于其它常见金属, 具有低的导电、导热性, 较高的塑性、韧性、抗损伤性和缺口不敏感性等特点, 已广泛应用于卫星波导、航天遥感器等仪器装备中^[8-9].

收稿日期: 2023-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275155、5220051748); 上海市 III 类高峰学科—材料科学与工程 (高能束流智能加工与绿色制造).

超快激光由于超高的峰值功率密度和超短脉冲时间在透明硬脆材料焊接领域显示出了巨大的潜力^[10]. 超快激光在蓝宝石/金属材料界面或者近界面聚焦时,其焦体积内的强度足以引起材料的非线性吸收,使得材料界面处发生局部熔化,并快速填充界面之间的原始间隙,随后液体快速凝固,最终在界面处形成微焊接. 由于超快激光的高度局域性,焊接区域最小特征尺寸可以达到微米级别,实现了微米量级的焊接精度,即微焊接^[11]. 由于超快激光非线性吸收空间选择性,在连接蓝宝石/金属时无需对连接构件进行整体宏观加热,进一步避免了连接界面在冷却过程中因膨胀系数的差异产生残余应力而造成裂纹等缺陷. 文中采用超快激光选区微焊接技术成功实现了蓝宝石和 Invar 合金的高可靠连接,并研究了激光平均功率的变化对蓝宝石/Invar 合金超快激光选区微焊接接头组织和性能的影响.

1 试验方法

试验所用的单晶蓝宝石 (Al_2O_3) 尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 和 Invar 合金 ($0.639\text{Fe}-0.361\text{Ni}$, 质量分数, %) 尺寸为 $15\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 3\text{ mm}$. 蓝

宝石表面粗糙度小于 170 nm , 平整度小于 $3.57\text{ }\mu\text{m}$. 超快激光焊接蓝宝石和 Invar 合金时,对样品间隙具有较为严格的要求,间隙不能超过最短可见光波长的 $1/4$,即达到光学接触^[12]. 为此,焊接前选用 400 目~2000 目金刚石砂盘以及 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的抛光剂对 Invar 合金进行磨抛处理,再用酒精超声清洗 10 min,清除表面沾染的各种颗粒和有机物,使表面粗糙度达到 800 nm 左右.

图 1 为蓝宝石与 Invar 合金超快激光选区微焊接示意图. 由激光器发出的脉冲激光,经反射镜反射进入扩束镜,被扩束后的脉冲再被多次反射进入小孔光阑,消除光斑外围杂散光,最后光束经过显微物镜 (50 倍, $NA=0.045\text{ 3}$) 被聚焦,聚焦光斑直径为 $11.1\text{ }\mu\text{m}$,激光焦点位于蓝宝石/Invar 合金的界面处,样品经夹具固定放置在由电机控制的 x - y 运动平台上, z 方向通过手动 z 轴调节. 试验所用超快激光器 (Femto YL-40) 波长为 1 030 nm ,激光功率最大 52 W ,重复频率 $0.025\sim5\text{ MHz}$. 焊接加工参数为激光平均功率 $7.24\sim10.19\text{ W}$,重复频率 200 kHz ,扫描速度 100 mm/s ,通过扩束镜将光斑直径调整为 $40\text{ }\mu\text{m}$,扫描线间距 $80\text{ }\mu\text{m}$,扫描方式为通过 x - y 振镜扫描器进行先水平、后竖直的网格式扫描.

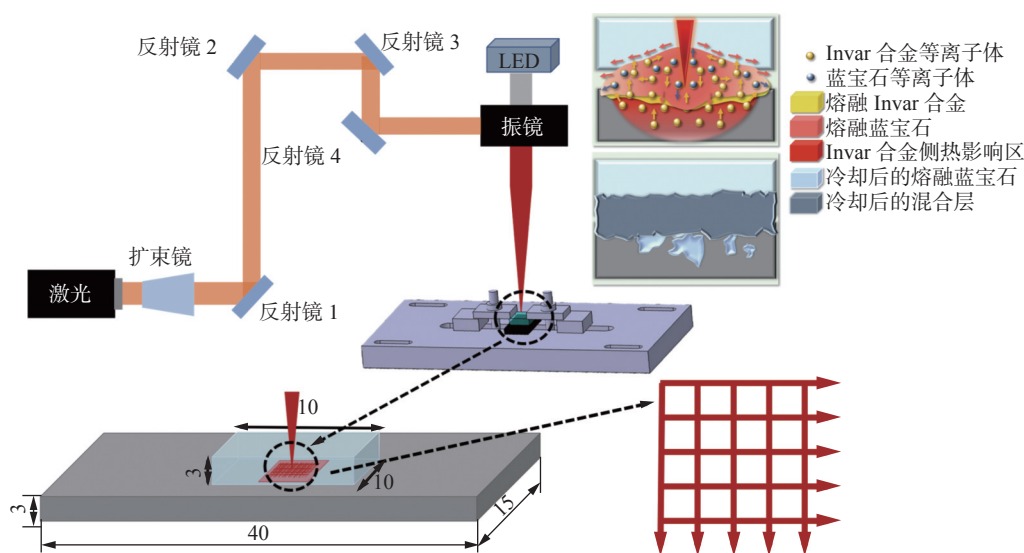


图 1 超快激光选区微焊接示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic illustration of femtosecond laser selective microwelding

采用油水混合物超声浸润法对蓝宝石/Invar 合金接头的密封性进行检测. 将样品放入容器中,添加适量的异丙醇,利用超声波清洗机清洗样品 $5\sim10\text{ min}$,清洗后将样品取出,吹干或烘干;再将准备

好的样品放在容器中,倒入油水混合物完全没过样品,将容器放入超声波清洗机中,超声 10 min ;最后在干燥箱中晾干后对样品表面的油水浸润区域进行观察与测量. 采用金刚石线切割机对蓝宝石/Invar

合金接头的横截面进行切割, 经过金相制样和处理后, 通过超景深显微镜对接头宏观形貌进行观察与分析; 采用 X 射线能谱仪 (EDS) 和扫描电子显微镜 (SEM) 进一步分析界面显微组织和成分分布; 通过抗剪切强度试验表征接头力学性能, 采用自制剪切夹具装配在万能力学试验机 (SFL-25AG) 上, 以 $1 \text{ mm}/(\text{min} \cdot \text{s})$ 恒定速度施加压力, 每组参数至少测试 3 个试样; 借助激光共聚焦显微镜 (LSCM) 分析蓝宝石/Invar 合金断口宏观形貌和三维形貌, 并采用 EDS 和 SEM 分别对蓝宝石侧和 Invar 合金侧的断口微观形貌和成分进行分析. 将制备好的蓝宝石/Invar 合金接头通过油水混合物超声浸润法, 表征蓝宝石/Invar 合金接头的密封性, 分析不同激光能量密度对接头密封性的影响.

2 试验结果与分析

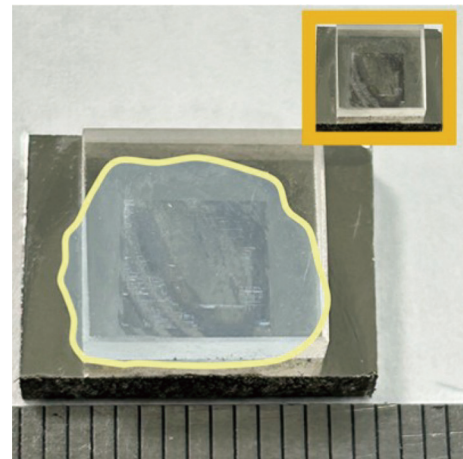
文中重点分析蓝宝石/Invar 合金超快激光选区微焊接接头组织与性能对激光平均功率变化的响应. 固定重复频率为 200 kHz 、加工速度为 100 mm/s 、线间距为 $80 \mu\text{m}$ 、扫描次数为 1 次, 焦点位于界面处, 激光平均功率分别为 7.24 、 8.23 和 10.19 W .

2.1 接头密封性

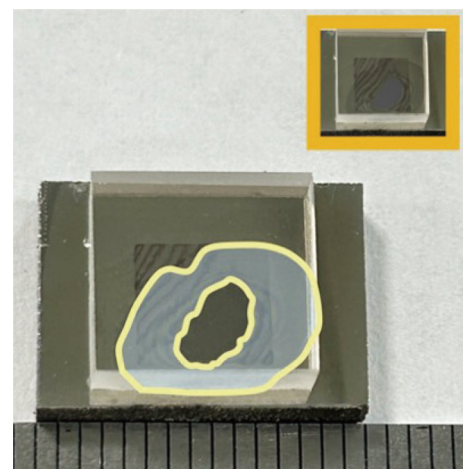
图 2 为不同激光功率蓝宝石/Invar 合金接头以及密封性测试结果, 浅蓝色区域即为油水混合物浸润的区域范围. 测试结果显示, 激光功率最低 (7.24 W) 和最高 (10.19 W) 制备的接头, 油水混合物已经全部进入焊接区域中 (黄色曲线包含区域). 当激光功率为 7.24 W 时, 激光作用所产生的热流体不足以填充原始界面间隙, 导致密封性较差; 当激光功率较高时 (10.19 W), 界面处烧蚀严重, 热损伤造成界面处产生微裂纹, 导致油水混合物从此处浸入; 当采用适中的激光功率 (8.23 W) 时, 焊接接头密封性良好, 此时油水混合浸入范围为零级衍射区以外 (即牛顿环最中心区域及黄色圆环线条包含区域).

2.2 宏观形貌

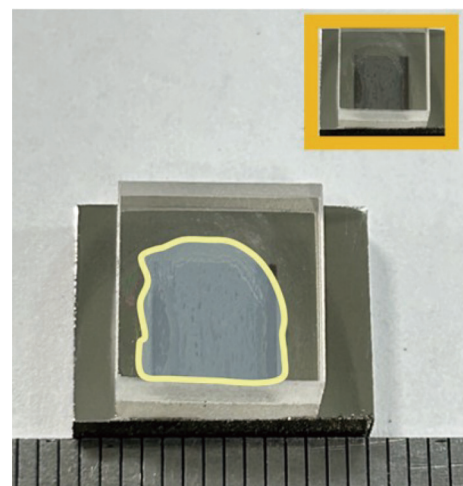
当飞秒激光聚焦在蓝宝石/Invar 合金界面处时, 聚焦区域内的能量密度高于材料烧蚀阈值, 使材料发生多光子离子化, 并形成等离子体. 等离子体的热效应使界面处蓝宝石和 Invar 合金发生熔化乃至汽化, 发生混合后填充界面处的间隙. 由于飞



(a) 7.24 W



(b) 8.23 W



(c) 10.19 W

图 2 不同激光功率蓝宝石/Invar 合金接头密封性试验
Fig. 2 Seal tightness testing of laser joints at different laser average powers. (a) 7.24 W ; (b) 8.23 W ; (c) 10.19 W

秒激光与材料的相互作用时间远低于材料的热响应时间 ($\sim 1 \mu\text{s}$), 因此可以在界面处实现极小的热影响区^[13].

图 3 为不同激光平均功率蓝宝石/Invar 合金飞秒激光接头的宏观形貌. 由图可知, 界面已实现有

效连接,并且没有明显的气孔或裂纹生成.当激光平均功率为 7.24 和 8.23 W 时,界面平直均匀,无显著材料混合;当激光平均功率增加到 10.19 W

时,界面出现了显著的交错现象,这可能是由于激光能量增加,提高了界面等离子体温度,加剧了界面材料的熔化、汽化以及混合^[14].

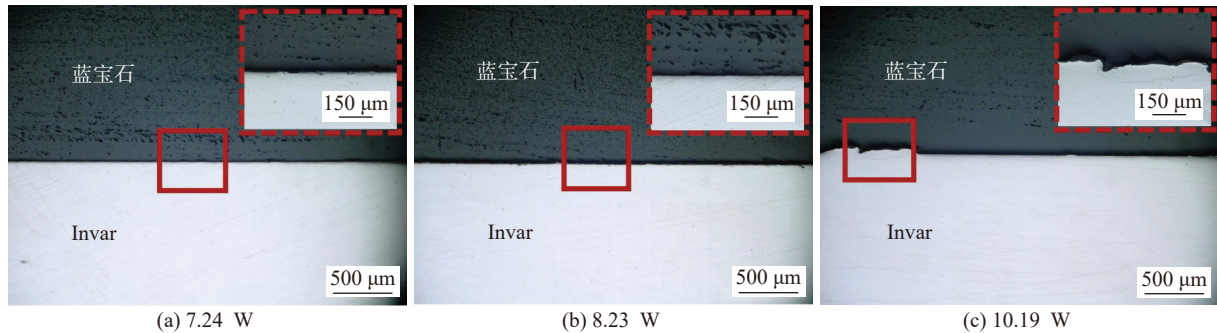


图 3 蓝宝石/Invar 合金飞秒激光选区微焊接头宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of laser joints at different laser powers. (a) 7.24 W; (b) 8.23 W; (c) 10.19 W

2.3 微观形貌

为了解激光功率对蓝宝石/Invar 合金飞秒激光接头界面熔合和填充的情况,借助 EDS 和 SEM 分析手段,对接头界面开展了进一步微观形貌组织分析.图 4 为激光平均功率 7.24 W 时,蓝宝石/Invar 合金飞秒激光焊接接头界面形貌.EDS 面扫描分析结果表明,界面处发生了显著的元素扩散,Al 和 O 元素向 Invar 合金侧的聚集更为明显;由于激光功率较低,激光束诱导的烧蚀作用减弱,焊接区域内样品分界面鲜明,界面热烧蚀以及热冲击作用下的热流体行为不足以完全填充界面处的原始间隙,导致界面间隙与裂纹的形成.

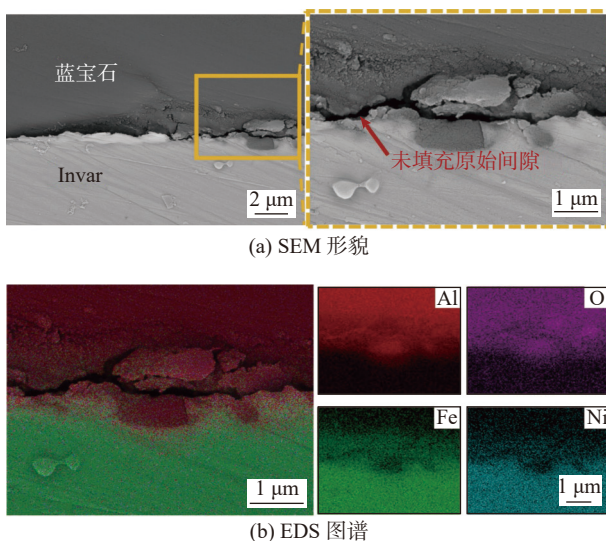


图 4 激光功率为 7.24 W 时界面 SEM 及 EDS 图

Fig. 4 Interfacial SEM and EDS analysis with laser power of 7.24 W. (a) SEM; (b) EDS

当激光功率增加到 8.23 W 时,激光作用区域

内样品之间不存在明显间隙(图 5).由于能量的增加,出现了蓝宝石向 Invar 合金侧的混合,即在远离界面 1~3 μm 的 Invar 合金内部出现了多块形状各异的蓝宝石结构.流体状冷凝特征表明激光作用区域发生了材料的熔化和快速固化过程,而该过程通常被认为是样品微区焊接的必要条件.值得注意的是,Invar 合金熔点为 1 430~1 450 °C、沸点约为 2 950 °C,蓝宝石的熔点 2 050 °C,沸点约为 3 500 °C.当界面温度大致介于 3 000~3 500 °C 时,Invar 合金达到沸点产生等离子体喷发时,蓝宝石仍然为熔融状态,后者将在熔池搅拌下发生流动进入前者,并产生典型的机械咬合特征,机械咬合的程度也将随着等离子体化范围增大而变大变深^[15-16].

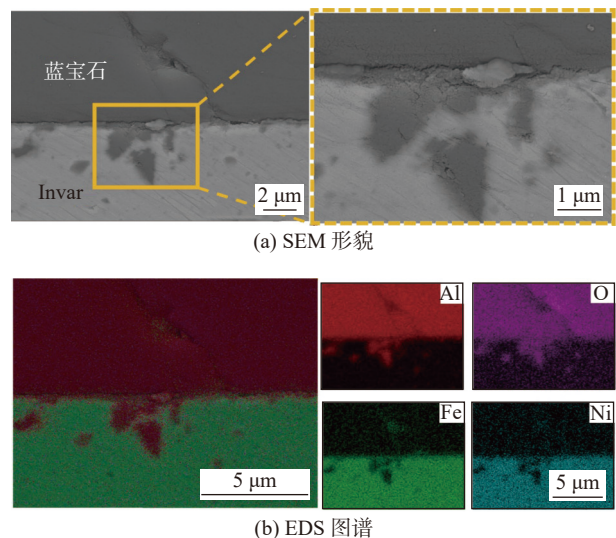


图 5 激光功率为 8.23 W 时界面 SEM 及 EDS 图

Fig. 5 Interfacial SEM and EDS analysis with laser power of 8.23 W. (a) SEM; (b) EDS

当激光功率增加到 10.19 W 时 (图 6), 界面的交融式焊接特征更加明显, 蓝宝石/Invar 合金接头的焊合处存在不规则的结合线. 在超快激光辐照过程中, 由激光诱导的液滴、团簇和颗粒等组成的等离子体在局部化区域内沿界面间隙发生了剧烈的等离子混合和扩散. 从图 6 能观察到微裂纹沿着焊缝界面分布, 主要原因为较强的热输入导致界面处较大的热累积和热应力, 从而导致微裂纹的产生. 当微裂纹产生后, 由于透明硬脆材料对裂纹非常敏感, 其极易作为断裂扩展路径, 在蓝宝石/Invar 合金接头中产生了薄弱环节, 并不利接头性能的提升. 尽管如此, 由于界面形成了大面积的咬合特征, 促进了界面机械咬合作用, 有利于接头性能的提升.

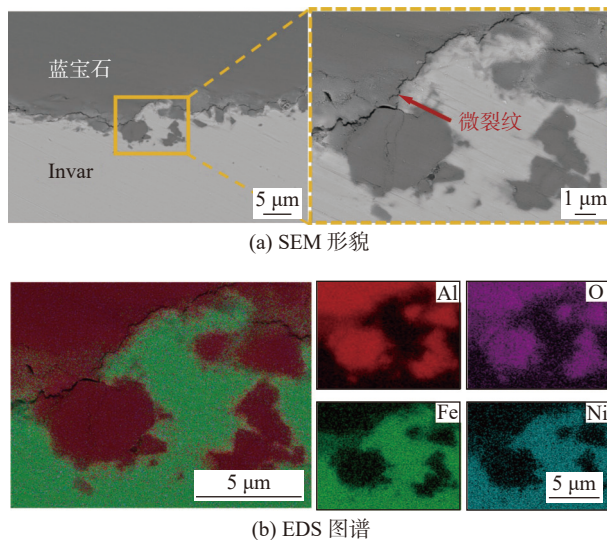


图 6 激光功率为 10.19 W 时界面 SEM 及 EDS 图
Fig. 6 Interfaial SEM and EDS analysis with laser power of 10.19 W. (a) SEM; (b) EDS

基于以上分析, 可以将超快激光作用下蓝宝石/Invar 合金界面处分为以下 4 种结合方式. ① 热效应使 Invar 合金侧发生熔化, 而蓝宝石侧不熔, 两种材料的连接仅靠熔融化的 Invar 合金冷却凝固连接^[17]; ② 两种材料都在激光的辐照下达到熔点温度, 熔融物经熔池搅拌混合达到连接目的; ③ Invar 合金侧达到一定的激光能量密度, 使表面产生等离子体, 等离子体与蓝宝石侧熔融物进行混合填充; ④ 界面处的两种材料均产生等离子体, 等离子体进行混合与扩散填充^[18].

2.4 接头力学性能分析

接头连接强度以抗剪强度为标准评估, 接头抗剪强度计算式为

$$R_{\tau} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

式中: R_{τ} 为接头抗剪强度, MPa; $F_{\max}$ 为最大剪切载荷, N; A 为加工面积, mm^2 , 均为 4 mm^2 .

图 7 为蓝宝石/Invar 合金飞秒激光焊接头抗剪强度随激光功率的变化规律. 由图可见, 接头抗剪强度随激光功率的增加而增加, 当激光功率增加到 10.19 W 时, 接头抗剪强度达到最大值 145.3 MPa. 因此为获得较高的接头强度, 可以适当提高激光辐照的峰值功率密度, 以有效提高材料的非线性吸收效率^[19]; 但过高的峰值功率密度容易导致激光作用区域产生热损伤、热应力残留, 甚至微纳多孔结构^[20].

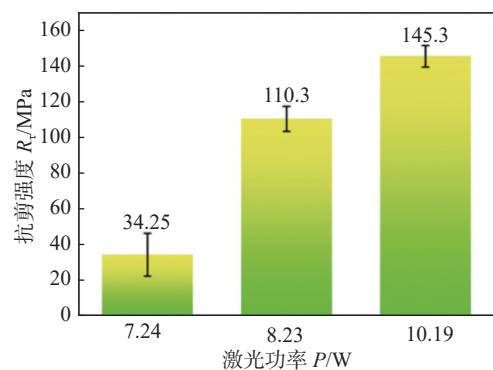


图 7 不同激光功率下的接头抗剪强度
Fig. 7 Joint shear strength vs laser power

表 1 为透明硬脆材料和其它材料不同连接方法与接头强度的对比. 通过对比可知, 蓝宝石/Invar 合金超快激光选区微焊接接头抗剪强度远高于钎焊和超声波焊接头. 此外蓝宝石/Invar 合金超快激光选区微焊接接头也远高于其它透明硬脆材料同质/异质超快激光连接接头强度, 说明超快激光焊接技术有望实现具有较大物理性能差异材料的

表 1 透明硬脆材料和其它材料不同连接方法与接头强度对比

Table 1 Brittle materials and other materials made by various joining methods and joint strength

文献	试验材料	连接方法	抗剪强度 R_{τ} /MPa
文献[21]	蓝宝石/氧化铝	活性钎焊	72.5
文献[22]	蓝宝石/ Sn-9Zn-2Al	超声辅助钎焊	46
文献[23]	蓝宝石/铝	超声波焊接	74.42
文献[24]	蓝宝石/4j33合金	钎焊	95
文献[25]	蓝宝石/蓝宝石	钎焊	70
文献[26]	硼硅酸盐玻璃/ 硼硅酸盐玻璃	超快激光	108
文献[27]	Nd:YAG晶体/ Nd:YAG晶体	飞秒激光	110

直接连接,有利于实现光机部件的高精度、高效率、高性能制造。

2.5 断口分析

图 8 为不同激光功率蓝宝石/Invar 合金接头剪切试验宏观断口形貌。在 3 组不同的激光功率下,接头剪切试验中发生断裂的位置均在接头界面处。当功率为 7.24 W 时,Invar 合金侧表面轻微烧蚀痕迹,且未在表面观察到蓝宝石的残留物质,断口蓝

宝石侧附着的白色物质,经 EDS 分析为含有 Fe 和 Ni 元素残留 Invar 合金;当激光功率增加到 8.23 W,在断口 Invar 合金侧和蓝宝石都能观察到两种材料剪切后的结合痕迹;当激光功率为 10.19 W 时,同一位置的热输入增加,Invar 合金侧及蓝宝石侧都出现明显的烧蚀,由于热应力过大,在剪切试验中蓝宝石侧产生了宏观裂纹(图 8b 右侧图中阴影位置为产生裂纹的区域)。

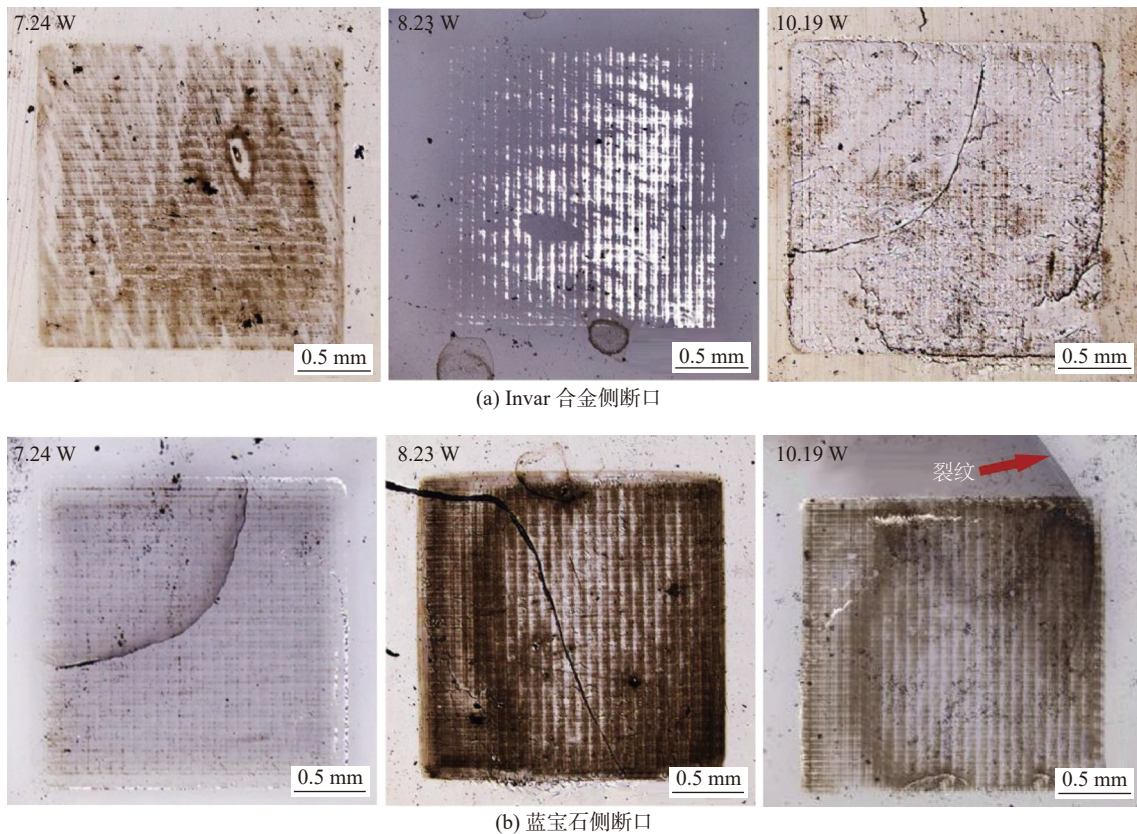


图 8 不同激光功率下的断口宏观形貌

Fig. 8 Macroscopic view of the fracture at different laser power. (a) Invar alloy side fracture; (b) sapphire side fracture

图 9 为不同激光功率断口 SEM 形貌。图 9a 为激光功率 7.24 W 时 Invar 合金侧及蓝宝石侧断口微观形貌和 EDS 点分析。由图可见, Invar 合金侧无蓝宝石元素的残留,蓝宝石侧断口白色附着物经能谱仪的点分析含有 Fe 和 Ni 元素(表 2),结合微观界面形貌分析可知, Invar 合金发生熔化填充界面成为实现连接的主导原因。由于金属流动的限制,造成焊接界面间隙的存在,从而在剪切后,附着着熔化 Invar 合金层的蓝宝石从界面处被剥离。

图 9b 为激光功率 8.23 W 时 Invar 合金侧及蓝宝石侧断口微观形貌和 EDS 点分析。Invar 合金侧断口检测到少量 Al 和 O 元素存在(表 2),说明此时界面处产生了混合熔融物,同时在一定区域内发

现明暗的织状烧蚀结构,此结构形貌为典型的超快激光诱导周期性表面结构,被命名为激光诱导周期性表面结构(LIPSS)^[28],当激光能量密度高于材料的烧蚀阈值时,材料表面才能形成 LIPSS 结构以及重熔产物。

当激光功率增加到 10.19 W 时(图 9c), Invar 合金侧断口表面观察到解理断裂的河流特征。对河流特征的不同区域进行 EDS 分析,河流白色边缘含有 Al 和 O 元素(表 2),说明蓝宝石在界面处发生脆性断裂,与蓝宝石硬脆的材料特质相匹配,且随着激光能量的增加, Invar 合金表面的 LIPSS 结构更加明显,周期性结构更加规律。蓝宝石侧断口附着物从片状变成了微纳米颗粒状,且分布范围更大更均匀,其中 Fe 和 Ni 元素的含量对比 7.24 和

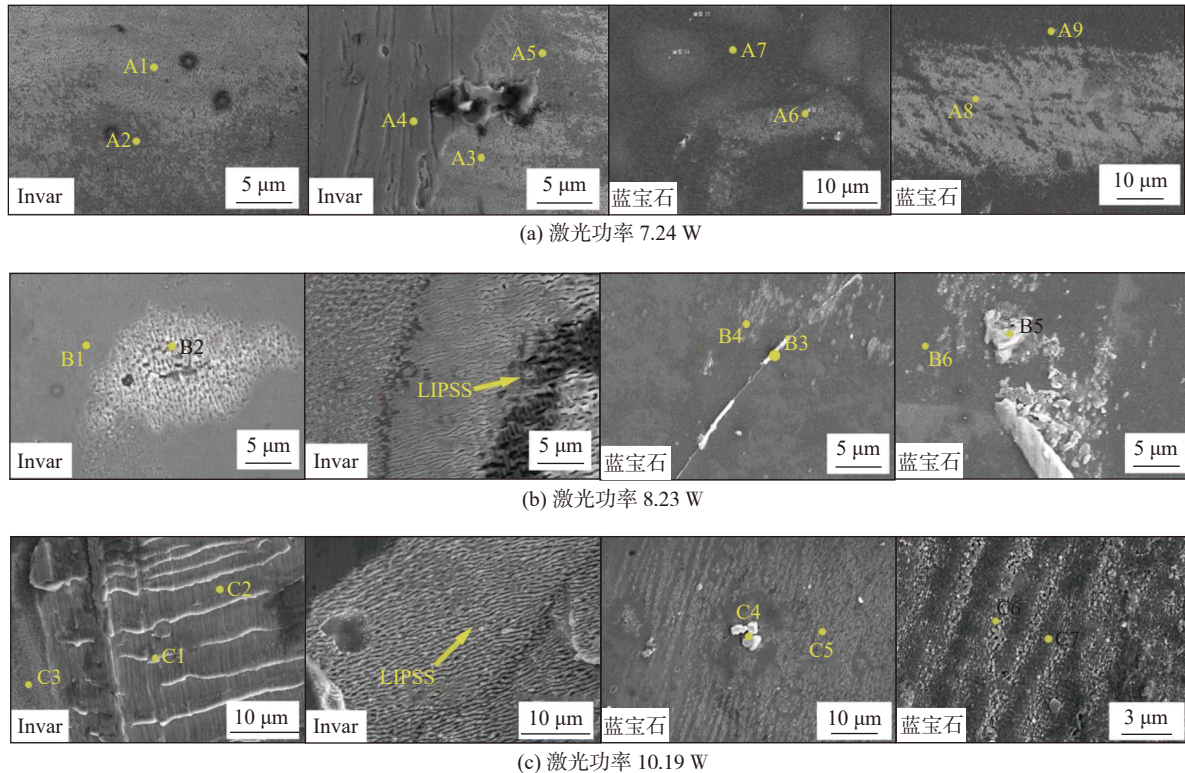


图 9 不同激光功率断口 SEM 形貌

Fig. 9 Fracture SEM at different power. (a) 7.24 W; (b) 8.23 W; (c) 10.19 W

表 2 图 9 对应 EDS 分析 (原子分数, %)

Table 2 EDS analysis of the points in Fig.9

位置	Fe	Ni	Al	O
A1	61.1	34.7	0.2	4.0
A2	60.9	35.4	0.1	3.6
A3	61.1	35.6	0.1	3.2
A4	61.0	35.4	0.2	3.4
A5	61.4	34.4	0.1	4.1
A6	1.7	1.5	55.7	41.1
A7	0.1	0	65.0	34.9
A8	5.0	1.8	54.7	38.5
A9	0.3	0.0	63.2	36.5
B1	61.4	35.0	0.4	3.1
B2	59.4	33.9	1.6	5.1
B3	26.2	17.0	26.4	30.4
B4	10.7	7.1	40.8	41.4
B5	50.1	31.4	6.4	12.1
B6	0.3	0.2	56.2	43.3
C1	61.8	32.9	1.3	4.0
C2	61.9	34.7	0.3	3.1
C3	55.2	31.4	3.2	10.2
C4	55.4	33.8	3.4	7.4
C5	4.2	2.9	42.4	50.5
C6	5.6	2.3	52.6	39.5
C7	0.3	0.0	57.8	41.9

8.23 W 的蓝宝石侧断口有所增加, 重熔物的尺寸显著减小 (表 2), 这是由于材料表面能量密度增加而引起烧蚀的程度增加, 烧蚀的羽流被随后的脉冲进一步激发, 碎片被进一步电离和汽化, 导致沉积的碎屑更小^[28].

3 结论

(1) 蓝宝石/Invar 合金飞秒激光接头焊缝成形良好, 无宏观裂纹、孔洞缺陷. 激光功率对蓝宝石/Invar 合金飞秒激光焊接接头密封性具有显著影响, 当激光功率为 8.23 W 时, 蓝宝石/Invar 合金接头密封性良好.

(2) 蓝宝石/Invar 合金接头界面产生了明显元素扩散, 说明存在界面冶金结合; 界面也出现了机械咬合作用, 并且随着激光功率的增加, 界面机械咬合程度增加, 说明接头连接机理整体为冶金结合和机械咬合.

(3) 蓝宝石/Invar 合金接头抗剪强度随着激光功率的增加而增加, 当功率为 10.19 W 时, 接头抗剪强度达到最大为 145.3 MPa.

参考文献

[1] 谢启明, 李奕威, 潘顺臣. 红外窗口和整流罩材料的发展和应

- 用[J]. 红外技术, 2012, 34(10): 559 – 567.
- Xie Qiming, Li Yiwei, Pan Shunchen. Development and application of infrared window and fairing materials[J]. Infrared Technology, 2012, 34(10): 559 – 567.
- [2] 李书齐, 史维琴, 李华卿, 等. 蓝宝石的焊接方法研究现状[J]. 焊接, 2019(3): 18 – 23.
- Li Shuqi, Shi Weiqin, Li Huaqing, *et al.* Current status of research on soldering methods for sapphire[J]. Welding & Joining, 2019(3): 18 – 23.
- [3] Wu Xiaowei, Fu Junhong, Wei Shoujing, *et al.* Bonding mechanisms of SiO₂ glass and 1060Al by ultrasonic assisted active metal soldering process[J]. China Welding, 2023, 32(2): 52 – 62.
- [4] 殷胜昔, 楚建新. 蓝宝石整流罩与金属弹体新型的连接方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(1): 54 – 57.
- Yin Shengxi, Chu Jianxin. Research on a new connection method between sapphire fairing and metal projectile[J]. Aerospace Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(1): 54 – 57.
- [5] 李琪, 刘凤美, 乐雄, 等. 热处理对 80 μm 间隙下 IC10 高温合金 TLP 扩散焊组织及高温性能的影响[J]. 焊接学报, 2021, 42(5): 36 – 44.
- Li Qi, Liu Fengmei, Le Xiong, *et al.* Effect of heat treatment on the organization and high-temperature properties of TLP diffusion welding of IC10 high-temperature alloy with 80 μm gap[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(5): 36 – 44.
- [6] Xin C, Li N, Yan J. Microstructural evolution in the braze joint of sapphire to Kovar alloy by Ti-Cu metallization layer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248: 115 – 122.
- [7] Chen B, Shi T, Liao G. Laser welding of Zr₄₁Ti₁₄Cu₁₂Ni₁₀Be₂₃ bulk metallic glass and zirconium metal[J]. Journal of Wuhan University of Technology Materials Science Edition, 2014, 29(4): 786 – 788.
- [8] 刘红兵, 宣扬, 杨瑾, 等. Invar 合金焊接技术研究现状及展望[J]. 航空制造技术, 2020, 63(9): 83 – 88.
- Liu Hongbing, Xuan Yang, Yang Jin, *et al.* Current status and prospect of Invar alloy welding technology[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2020, 63(9): 83 – 88.
- [9] 李范, 郭诚. 激光选区熔化 4J36 因瓦合金成形工艺及性能[J]. 热加工工艺, 2023(21): 87 – 92.
- Li Fan, Guo Cheng. Forming process and properties of laser zone melting 4J36 Invar alloy[J]. Thermal Processing Technology, 2023(21): 87 – 92.
- [10] Orazi L, Romoli L, Schmidt M, *et al.* Ultrafast laser manufacturing: from physics to industrial applications[J]. CIRP Annals, 2021, 70(2): 543 – 566.
- [11] 张功达, 朱琦, 刘亚运, 等. 表面微结构对铝合金与 PA66 激光焊性能影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(8): 28 – 33, 48.
- Zhang Gongda, Zhu Qi, Liu Yayun, *et al.* Influence of surface microstructure on laser welding performance of aluminum alloy with PA66[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(8): 28 – 33, 48.
- [12] 程战, 郭伟, 刘磊, 等. 石英玻璃与硅的飞秒激光微焊接及其接头性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 225 – 231.
- Cheng Zhan, Guo Wei, Liu Lei, *et al.* Femtosecond laser micro-welding of quartz glass to silicon and its joint properties[J]. China Laser, 2015, 42(9): 225 – 231.
- [13] 潘泽浩, 程战, 刘磊, 等. 石英玻璃飞秒激光微焊接及其性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 5 – 8.
- Pan Zehao, Cheng Zhan, Liu Lei, *et al.* Femtosecond laser micro-welding of quartz glass and its properties[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 5 – 8.
- [14] Ciuca O P, Carter R M, Prangnell P B, *et al.* Characterisation of weld zone reactions in dissimilar glass-to-aluminium pulsed picosecond laser welds[J]. Materials Characterization, 2016, 120: 53 – 62.
- [15] Yan T, Zhan X, Gao Q, *et al.* Influence of laser power on molten pool flow field of laser-MIG hybrid welded Invar alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 133: 1106539.
- [16] Gao Q, Yan T, Ling W, *et al.* Effect of vapor/plasma-liquid flow behavior on the keyhole oscillation in laser-MIG hybrid welding of Invar alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107054.
- [17] Watanabe W, Li Y, Itoh K. Ultrafast laser micro-processing of transparent material[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 52 – 61.
- [18] Pan R, Yang D, Zhou T, *et al.* Micro-welding of sapphire and metal by femtosecond laser[J]. Ceramics International, 2013, 49: 21384 – 21392.
- [19] Ouyang Z, Okamoto Y, Ogino Y, *et al.* Influence of numerical aperture on molten area formation in fusion micro-welding of glass by picosecond pulsed laser[J]. Applied Sciences, 2019, 9 (7): 1412.
- [20] Ji C H, Huang Y J, Chen X, *et al.* Direct microwelding of dissimilar glass and Kovar alloy without optical contact using femtosecond laser pulses[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(10): 3422 – 3435.
- [21] 宁洪龙, 黄福祥, 马莒生, 等. 蓝宝石的 Ag(70.5) Cu(27.5)Ti₂ 合金活性封接[J]. 稀有金属材料与工程, 2003(3): 236 – 239.
- Ning Honglong, Huang Fuxiang, Ma Jusheng, *et al.* Active sealing of Ag(70.5) Cu(27.5)Ti₂ alloy in sapphire[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003(3): 236 – 239.
- [22] Xu Y, Ma X, Yan J. Evolution of interfacial structures and mechanical performance of sapphire and Sn-9Zn-2Al joints by ultrasound[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2019, 16(6): 2254 – 2264.
- [23] Lü J, Xiao Y, Liu B, *et al.* Microstructure evolution and interfacial bonding mechanisms of ultrasonically soldered sapphire/Al dissimilar joints using Sn-based solders[J]. Ceramics International, 2022, 48(14): 20070 – 20077.

- [9] Ingo Alig, Pötschke P, Lellinger D, *et al.* Establishment, morphology and properties of carbon nanotube networks in polymer melts[J]. *Polymer*, 2012, 53(1): 4 – 28.
- [10] Gu Y, Wu A, Federici J F, *et al.* Inkjet printable constantan ink for the fabrication of flexible and conductive film[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 27 – 36.
- [11] 冯敏. 碳纳米管化学镀铜增强铜基复合材料的工艺研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- Feng Min. Process research on electroless copper plating of carbon nanotubes reinforced copper matrix composites[D]. Kunming: Kunming University of Science And Technology, 2017.
- [12] Zeng M, Ling Y, Zhang P, *et al.* Improvement of interfacial interaction and mechanical properties in aluminum matrix composites reinforced with Cu-coated carbon nanotubes[J]. *Materials Science & Engineering, A*, 2023, 870: 144918.
- [13] Maqbool A, Hussain M A, Khalid F A, *et al.* Mechanical characterization of copper coated carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites[J]. *Materials Characterization*, 2013, 86(8): 39 – 48.
- [14] Joo S J, Park S H, Moon C J, *et al.* A highly reliable copper nanowire/ nanoparticle ink pattern with high conductivity on flexible substrate prepared via a flash light-sintering technique[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(10): 5674 – 5684.
- [15] 潘静, 卞立春, 高明. 团聚参数对纳米复合材料性能的影响分析 [C]//中国力学大会-2017 暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会论文集 (A), 2017.
- Pan Jing, Bian Lichun, Gao Ming. The effect of agglomeration parameters on the properties of nanocomposites[C]//Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics-Proceedings of the 2017 Celebration of the 60th Anniversary of the Establishment of the Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics (A), 2017.
- [16] 刘中常. 纳米材料中纳米粒子团聚的原因及解决方法 [J]. *价值工程*, 2017, 36(13): 2.
- Liu Zhongchang. Reason for aggregation of nanoparticles in nanomaterials and solutions[J]. *Value Engineering*, 2017, 36(13): 2.
- [17] Khan I A, Flora J R V, Afrooz A R M N, *et al.* Change in chirality of semiconducting single-walled carbon nanotubes can overcome anionic surfactant stabilisation: a systematic study of aggregation kinetics[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12(6): 652.
- [18] 郭鲤, 詹浩, 游玉萍, 等. 预处理及化学镀铜后碳纳米管的微观形貌及成分 [J]. *机械工程材料*, 2019, 43(8): 6.
- Guo Li, Zhan Hao, You Yuping, *et al.* Micromorphology and chemical composition of carbon nanotubes after pretreatment and electroless copper plating[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2019, 43(8): 6.
- [19] 王艳. 碳纳米管铜复合材料的制备及性能研究 [D]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2019.
- Wang Yan. Study on preparation and properties of carbon nanotube/copper composites[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Aeronautics, 2019.
- [20] Chen B, Li S, Imai H, *et al.* Load transfer strengthening in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via in-situ tensile tests[J]. *Composites Science & Technology*, 2015, 113(5): 1 – 8.

第一作者: 赵鑫宇, 硕士; 主要从事电子封装技术方面的研究工作; Email: xinyu2648357@163.com.

通信作者: 黄永德, 博士, 教授; Email: huangydhm@nchu.edu.cn.

(编辑: 郑红)

[上接第 48 页]

- [24] Yao X, Zhao Y, Huang Y, *et al.* A novel CoCrNi medium entropy alloy enhanced AgCuTi composite filler to braze Kovar alloy and sapphire[J]. *Materials Characterization*, 2023, 197: 112668.
- [25] Guo W, Lin T, He P, *et al.* Microstructure and characterization of interfacial phases of sapphire/sapphire joint bonded using Bi₂O₃-B₂O₃-ZnO glass[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37(3): 1073 – 1081.
- [26] Richter S, Zimmermann F, Döring S, *et al.* Ultrashort high repetition rate exposure of dielectric materials: laser bonding of glasses analyzed by micro-Raman spectroscopy[J]. *Applied Physics A*, 2012, 110(1): 9 – 15.
- [27] Lipateva T O, Okhrimchuk A G, Lipatiev A S, *et al.* Robust and adhesive-free joint of Nd: YAG crystals by femtosecond laser-assisted welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107594.
- [28] Zhang Y, Jiang Q, Long M, *et al.* Femtosecond laser-induced periodic structures: mechanisms, techniques, and applications[J]. *Opto-Electronic Science*, 2022, 1(6): 220005.

第一作者: 蒋青, 硕士; 主要研究方向为蓝宝石异质超快激光连接工艺与机理; Email: jiangq_ng@163.com.

通信作者: 杨瑾, 博士, 副教授; Email: jyang@sues.edu.cn.

(编辑: 郑红)